

0- 793732

На правах рукописи



Шульгина Тамара Михайловна

**Разработка и применение комплекса программ для анализа региональных
изменений климата на основе данных моделирования**

Специальность 05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения РАН (ИМКЭС СО РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Гордов Евгений Петрович

Официальные оппоненты: Шлычков Вячеслав Александрович,
доктор физико-математических наук,
ФГБУН Институт водных и экологических
проблем СО РАН, главный научный сотрудник

Молородов Юрий Иванович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
ФГБУН Институт вычислительных технологий
СО РАН, старший научный сотрудник

Ведущая организация: Научно-исследовательский вычислительный
центр МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Защита состоится 20 марта 2012 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 003.061.02 при Учреждении Российской академии наук Институте вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 6, тел. (383)330-71-59.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН.

Автореферат разослан «14» *апреля* 2012 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КФУ



0000802445

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 003.061.02
д.ф.-м.н.

С.Б. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Происходящие в последние десятилетия изменения климата¹ влекут стремительное развитие технологий их мониторинга, моделирования и прогнозирования². Накапливаемые архивы метеорологических данных и разрабатываемые методики их обработки открывают перед исследователями широкие возможности для решения климатических задач различного уровня сложности. Однако, разнородность имеющейся метеорологической информации и многообразие методов ее обработки заметно усложняют процесс анализа и сопоставление получаемых результатов.

Для систематизации и стандартизации процедур исследования на сегодняшний день помимо инструментариев рабочего стола (Excel, Statistica, ArcGIS, MatLab и др.) активно используются тематические веб-порталы (KNMI Climate Explorer, ECA&D EUMETNET, Giovanni GES DISC NASA, Climvis NND C Climate Data Explorer, NCAR Command Language, ECMWF Eraclim и др.), созданные на основе современных информационно-вычислительных технологий. Однако, большинство стандартных инструментариев требуют наличия архивов данных на рабочем месте, что создает ряд трудностей их использования ввиду больших объемов архивов метеорологической информации. Архивы метеорологических данных, предлагаемые для работы специализированными веб-порталами, решают эти вопросы, но набор типовых процедур обработки этих данных дает возможность изучить лишь основные закономерности атмосферных процессов. Кроме того, задачи описания региональных климатических процессов, где необходима детализация изменений метеорологической величины в пространстве с учетом природно-климатических особенностей региона³, порождают ряд вопросов о репрезентативности используемых метеорологических данных и накладывают требования на используемые методики анализа.

Получение достоверной информации о пространственно-временном поведении метеорологических величин на территории исследуемого региона является актуальной задачей и достигается созданием и применением комплекса программ, который позволяет проводить:

- 1) оценку достоверности используемой метеорологической информации и выбор набора полей климатического моделирования;
- 2) расчет широкого набора характеристик, учитывающих специфику используемого климатологического материала и природно-климатические особенности региона;

¹ Анализ изменений климата и их последствий : Труды ГУ ВНИИГМИ-МЦД / под ред. Разуваева В.Н., Шерстюкова Б.Г. Обнинск. 2010. 278 с.

² Дымников В.П., Лыкоsov В.П. и др. Моделирование климата и его изменений // Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. М., 2005. Т. 2. С. 36-175.

³ IPCC: 2007. Climate change. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

3) анализ изменения климата региона с использованием апробированного вероятностно-статистического аппарата.

Детальное описание поведения метеорологических величин выбранного региона создает надежную основу для валидации климатических моделей и разработки новых инструментов моделирования регионального климата. Кроме того, реализация такого подхода в виде комплекса вычислительных процедур, расширяет круг его применения до возможности использования при решении разного рода междисциплинарных практических задач, вызванных к жизни наблюдаемыми и прогнозируемыми изменениями климата. Рассмотренный в работе регион Сибири, в силу своих природно-климатических особенностей⁴, представляет огромный интерес для проведения такого рода исследований.

Таким образом, целью диссертационной работы явилась разработка комплекса программ для исследования региональных климатических изменений на основе статистического анализа метеорологических данных.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. На основе сравнения с натурными измерениями разработать методику выбора данных климатического моделирования, достоверно описывающих региональные пространственно-временные изменения метеорологических величин.

2. Провести обзор существующих методов обработки метеорологической информации и на его основе сформировать набор климатических характеристик и апробированных статистических методов для исследования изменений регионального климата.

3. На основе выбранных методов обработки и анализа данных разработать комплекс программ для изучения изменений регионального климата.

4. С использованием разработанного комплекса программ провести анализ динамики приземной температуры воздуха и количества осадков на территории Сибири за последние несколько десятилетий.

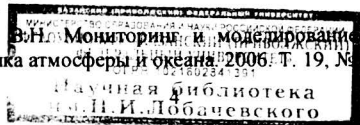
На защиту выносятся следующее:

1. Методика выбора данных климатического моделирования, наиболее близко воспроизводящих пространственное и временное поведение наблюдаемых метеорологических величин.

2. Комплекс программ для выбора метеорологических данных и их обработки с использованием сформированного набора климатических характеристик и апробированных статистических методов.

3. Результаты анализа пространственно-временной динамики приземной температуры воздуха и количества осадков на территории Сибири с использованием разработанного комплекса программ.

⁴ Кабанов М.В., Лыков В.Н. Мониторинг и моделирование природно-климатических изменений в Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19, № 6. С. 753-764.



Научная новизна, полученных автором результатов, заключается в следующем:

1. Разработана методика выбора данных климатического моделирования наиболее близких к значениям данных наблюдений в узлах отдельных станций с использованием набора апробированных методов, объединившего в себе процедуры подбора метода интерполяции и проверки однородности сравниваемых рядов для всего интервала исследования.

2. Разработан комплекс программ для проведения исследований региональных климатических изменений, объединивший в себе процедуры выбора и обработки метеорологических данных.

3. Впервые для территории Сибири произведен подбор данных моделирования приземной температуры воздуха и количества осадков, наиболее близких к натурным измерениям, и выполнено исследование временной динамики этих метеорологических величин и ее влияния на растительность.

Практическая значимость работы определяется возможностью решения междисциплинарных задач изучения наблюдаемых и прогнозируемых изменений регионального климата. Программный комплекс может быть использован для оценки динамики метеорологических величин для любого региона. Результаты проведенного исследования дают достоверную основу для валидации существующих и создания новых региональных климатических моделей.

Работа выполнялась в рамках научных проектов, поддержанных грантами РФФИ (№10-07-00547, 11-05-01190), проектом ЕС FP6 Enviro-RISKS (INCO-CT-2004-013427), Программой фундаментальных исследований СО РАН (проекты 4.31.1.5, 4.31.2.7) и интеграционными проектами СО РАН 4, 8, 9, 50 и 66.

Результаты диссертации использованы при выполнении НИР в проектах Федеральных целевых программ (гос. контракт Минобрнауки РФ 07.514.11.4044 и гос. контракт Минобрнауки РФ 14.740.11.0409).

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, сделанных в диссертационной работе, основана на корректном применении апробированных статистических методов обработки временных рядов приземной температуры воздуха и количества осадков. Полученные результаты подтверждаются сравнением с результатами аналогичных исследований, полученными другими авторами.

Личный вклад автора диссертационной работы состоит в активном участии автора на этапе постановки задач, разработке методики выбора метеорологических данных, подборе климатических характеристик и статистических методов и их организации в виде комплекса программ, проведении, с использованием разработанного вычислительного комплекса, анализа динамики приземной температуры воздуха и количества осадков на территории Сибири.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались соискателем на международных и российских конференциях:

1) Генеральная ассамблея европейского геонаучного объединения “EGU” (Австрия, Вена 2008, 2009, 2010, 2011);

2) Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды “ENVIROMIS” (Томск 2008, 2010);

3) Первая и вторая международные конференции по анализу и моделированию данных в науках о Земле “DAMES” (Германия, Потсдам 2008; Португалия, Лиссабон 2010);

4) Международная конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде “CITES” (Красноярск 2009, Томск 2011);

5) Восьмое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу (Томск 2009);

6) Всероссийская конференция с участием иностранных ученых «Проблемы мониторинга окружающей среды (ЕМ-2009)» (Кемерово 2009);

7) Вторая международная конференция «Геоинформатика: технологии, научные проекты» (Барнаул 2010);

8) Всероссийская конференция RCDL 2010 «Электронные библиотеки: Перспективные методы и технологии, Электронные коллекции» (Казань 2010);

9) Осенняя конференция Американского геофизического союза “AGU” (США, Калифорния, Сан-Франциско 2010, 2011);

10) Научно-техническая конференция по проблемам гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата Сибири (Новосибирск 2011);

11) Международная конференция «Бореальные леса в изменяющемся мире: проблемы и потребности для действий» “IBFRA” (Красноярск 2011).

Объем и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и приложений. Общий объем диссертации составил 111 страниц; работа содержит 74 рисунков и 16 таблиц; список цитируемой литературы включает 94 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы основные цели и задачи диссертационного исследования. Подчеркнута научная новизна, раскрыты теоретическая значимость и практическая ценность полученных результатов исследования. Перечислены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертационной работы представлено описание архивов метеорологических данных, методики выбора данных климатического моделирования, на основе их сравнения с данными инструментальных наблюдений, а также набора климатических характеристик и апробированных статистических методов для обработки и анализа этих архивов данных.

Основным источником инструментальных наблюдений послужил специализированный массив данных суточной температуры воздуха и количества осадков по 223 станциям⁵, расположенным на территории 35,28° – 80,60° с.ш. и 14,30° – 190,17° в.д. Максимальный временной период покрытия наблюдениями составил интервал 1.01.1881 – 31.12.2010. Также в работе был рассмотрен архив 9092c *Global Synoptic Network*⁶, содержащий ряды почасовых измерений метеорологических величин с 2095 наземных синоптических станций на той же территории, покрывая наблюдениями период 01.01.1881 – 01.01.2000 в зависимости от срока работы станции. Данные моделирования, использованные в работе, представлены архивами полей метеорологических величин, полученными в рамках нескольких крупнейших проектов Реанализа (данные реанализа) (Таб. 1)⁷. При формировании таких наборов данных используются глобальные климатические модели, содержащие комплексные системы усвоения многолетних архивов инструментальных наблюдений. Указанные поля метеорологических величин, как правило, заданы на равномерной горизонтальной сетке и имеют глобальное покрытие по всему земному шару.

Таблица 1. Характеристики данных реанализов

Название Реанализа	Организация	Период Реанализа	Разрешение данных	Метод усвоения	Формат файлов
NCEP/NCAR	NCEP/NCAR	1951–2001	12ч, 1,875°×1,875° 17 ур. дав.	3D-Var	GRIB
NCEP/DOE AMIP II	NCEP/DOE	1979–2003	6ч, 1,875°×1,875° 17 ур. дав.	3D-Var	NetCDF
ECMWF ERA-40	ECMWF	1957.9–2002.8	6ч, 2,5°×2,5° 23 ур. дав.	3D-Var	NetCDF
ECMWF ERA INTERIM	ECMWF	1989–2010	6ч, 1,5°×1,5°	4D-Var	NetCDF

Кроме того, был рассмотрен набор данных APHRODITE JMA⁸, содержащий поля суточных данных количества осадков за период 01.01.1979 – 31.12.2007, полученные путем интерполяции наблюдений метеорологических величин сети наземных станций на горизонтальную равномерную сетку с разрешением 0,5°×0,5°.

Поскольку рассмотренные архивы данных, представляют собой результаты компьютерных расчетов, они, безусловно, имеют отличия от

⁵ Булыгина О.Н., Разуваев В.Н. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на 223 метеорологических станциях [Электронный ресурс] // Российский гидрометеорологический портал. Электрон. дан. М., 1998-2012. URL: <http://www.meteo.ru/climate/descrip1.htm>.

⁶ Data documentation for dataset 9290c. Global Synoptic Climatology Network. The former USSR. National Climatic Data Center, 2005.

⁷ Jenne R. Reanalysis: The observations and analysis // Large scale observations: a SEARCH workshop. Seattle, WA, 2001. 7 p.

⁸ APHRODITE JMA [Electronic resource] // Research Institute for Humanity and Nature. Electron. data. Kyoto, 2008-2012. URL: http://www.chikyu.ac.jp/precip/data/APHRO_V1003R1_readme.txt.

натурных измерений, а также различаться между собой в виду влияния на получаемые значения метеорологических переменных численного моделирования соответствующих физических процессов. Для определения полей климатического моделирования наиболее близких к натурным измерениям метеорологических величин в работе предложена методика сравнения этих полей с рядами инструментальных наблюдений. Алгоритм, реализующий эту методику, включает подготовительный этап формирования однородных рядов наблюдений, этап восстановления данных реанализа в координатах положения станций с использованием выбранного метода интерполяции и этап проверки статистических гипотез об однородности рядов интерполированных данных реанализов и инструментальных наблюдений.

Ввиду того, что инструментальные наблюдения, используемые в данной работе, имеют пропуски измерений и различия в длине рядов, автором сформулирован набор условий, выполнение которых обеспечивает формирование набора рядов наблюдений, обладающих полной информацией о поведении метеорологической величины на заданном временном промежутке исследования. Согласно поставленным условиям нижняя и верхняя временные границы рядов устанавливаются в соответствии с временным интервалом наличия данных наблюдений и реанализов. Анализ информативности рядов в пределах выбранного временного диапазона включает процедуру проверки полноты измерений метеорологической величины в сутках, месяце, годе, выборке. Наблюдение метеорологической величины в пределах суток должно содержать полный набор ее измерений в соответствии со стандартами установленной системы наблюдений. В противном случае наблюдения за эти сутки исключаются из рассмотрения. В случае, если на выбранном временном отрезке произошла смена системы наблюдений, это должно быть учтено при анализе пропусков измерений метеорологической величины. В рамках месяца наблюдения могут отсутствовать не более чем за трое изолированных друг от друга суток. В противном случае наблюдения этого месяца также исключаются из рассмотрения. Каждый год выбранного временного участка должен содержать измерения метеорологической величины за все 12 месяцев. Кроме того, полученная выборка (временной ряд наблюдений станции), элементами которой являются наблюдения метеовеличины для каждого года, должна содержать не более 20% пропусков ее элементов, а приоритет отдан выборкам, имеющим не более 5% пропусков. Полученные ряды наблюдений приводятся к единому формату представления данных: единый шаг измерений по времени (суточные значения), файлы данных в формате .dbf с названием согласно идентификационному номеру станции, установленному ВМО. Этот набор условий позволяет выбрать ряды с достаточно полным объемом метеорологической информации для достоверного воспроизведения картины поведения метеорологической величины на выбранном промежутке исследования.

На следующем шаге схемы выполняется интерполяция данных реанализа в координатах местоположения станций. С этой целью был произведен выбор метода интерполяции, по результатам тестирования методов билинейной

интерполяции, интерполяции полиномом третьей степени, метода взвешенных обратных расстояний, модифицированного метода Шепарда и базового геостатистического крайгинг-метода на основе данных реанализов разных версий при различных размерах сетки. Наименьшие значения среднего и среднеквадратического отклонений были получены при реализации модифицированного метода Шепарда⁹, основная идея которого заключается в построении сглаженной двумерной функции C , интерполирующей значения f_k в разбросанных узлах (x_k, y_k) на плоскости для $k=1, 2, \dots, N$. Интерполянт определен как

$$C(x, y) = \sum_{k=1}^N W_k(x, y) C_k(x, y) / \sum_{k=1}^N W_k(x, y),$$

где точечная функция C_k есть двумерный кубический полином, который интерполирует значения f_k в узлах k и подгоняет значения на набор близлежащих узлов в виде взвешенных наименьших квадратов. Ненормированными весами являлись функции обратных расстояний:

$$W_k(x, y) = \left[\frac{(R_w - d_k)_+}{R_w d_k} \right]^3, \quad (R_w - d_k)_+ = \begin{cases} R_w - d_k, & d_k < R_w \\ 0, & d_k \geq R_w \end{cases},$$

где $d_k(x, y)$ есть евклидово расстояние между (x, y) и (x_k, y_k) , а R_w радиус влияния узла (x_k, y_k) . Интерполированная величина в точке (x, y) зависит только от данных в узлах, чьи радиусы влияния содержат точку (x, y) .

Выбранным методом значения данных реанализа интерполированы в координатах положения станций. Полученные ряды интерполированных данных сопоставляются с данными инструментальных наблюдений в терминах различных климатических показателей, рассчитанных на основе этих рядов. Этап сравнения рядов климатических характеристик включает расчет среднего и среднеквадратического отклонений, оценку однородности рядов по критериям Хи-квадрат и Вилкоксона, а также оценку степени корреляционной связи сравниваемых рядов¹⁰. Полученные в результате вычислений сравнительные оценки позволяют выбрать архив данных реанализа, поля метеорологических величин которого наиболее близки к их натурным измерениям, полученным с наземных метеостанций.

Для анализа пространственно-временной динамики выбранных метеорологических данных в работе сформирован и представлен перечень климатических характеристик и апробированных статистических методов, учитывающих специфику используемого климатологического материала и природно-климатические особенности региона. В рассмотрение были включены основные статистические характеристики, показатели временной структуры метеорологических рядов и показатели экстремальных явлений. Статистические характеристики представлены средним арифметическим,

⁹ Renka, R.J. Algorithm 790 – CSHEP2D: Cubic Shepard Method for Bivariate Interpolation of Scattered Data // ACM Trans. Math Softw. Vol. 25. P. 70-73.

¹⁰ Storch H. von, Zwiers F.W. Statistical analysis in climate research. Cambridge, 1999. 484 p.

дисперсией, асимметрией и эксцессом. Показатели временной структуры метеорологических рядов выражены характеристиками периодических и непериодических изменений метеорологических величин во времени. К показателям периодических изменений отнесены климатические нормы (средние значения за период 1961–1990 гг.), отклонения от этих норм, суточный и годовой ход метеорологических величин. Показатели непериодических изменений представлены характеристиками непрерывной продолжительности и повторяемости атмосферных явлений со значениями метеорологических величин выше или ниже заданных пределов для разных моментов времени: $X_i > k$, $X_i < k$, где k – фиксированное пороговое значение величины метеорологической величины. Кроме того, решение многих задач анализа климатических процессов связано с изучением экстремальных явлений, сведения о которых могут быть получены из крайних значений метеорологических элементов, абсолютных экстремумов и квантилей. Особенности временной динамики метеорологических величин определяются долговременными трендами, значимость которых проверяется по критерию Стьюдента. Для выявления связей между метеорологическими величинами в данной работе используется коэффициент корреляции.

Таким образом, предложенный автором подход комплексной обработки метеорологической информации обеспечивают достоверное детальное описание поведения исследуемой метеорологической величины в заданных пространственно временных масштабах.

Во второй главе диссертационной работы приведено описание созданного программного комплекса, реализующего методы выбора, обработки и анализа метеорологических данных,

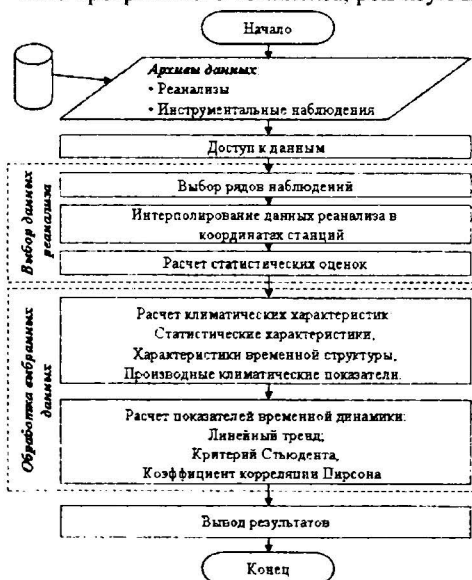


Рис. 1. Блок-схема комплекса программ

предложенные автором и описанные в первой главе текста диссертации. Разработанный программный комплекс представляет собой модульную структуру (Рис. 1). Методика сравнения данных наблюдений и реанализа реализована в виде ряда программных модулей для формирования однородных рядов наблюдений, интерполирования значений данных реанализа в координатах отобранных метеостанций и оценки согласованности этих значений с величинами натурных измерений. Программные модули формирования рядов наблюдений включают процедуру компоновки рядов в результате анализа пропусков измерений метеовеличин на различных

временных сегментах (сутки, месяц, год, период исследования) по сформулированным условиям отбора, процедуру приведения полученных рядов измерений к единому формату представления данных (структура и формат файлов данных). Программные модули разработаны с использованием высокоуровневого языка программирования Python 2.6, выбор которого обусловлен простотой написания кода и широкими возможностями стандартной библиотеки функций. Программы, реализующие процедуры выбора метода интерполяции, с последующим его применением для восстановления данных реанализа в координатах метеостанций, оценкой согласованности интерполированных и инструментально измеренных метеовеличин, разработаны с использованием языка программирования высокого уровня ITTVIS Interactive Data Language 7.0 (IDL), ввиду наличия в нем обширной библиотеки процедур для математической и графической обработки данных. Результаты сравнения данных представлены числовыми значениями отклонений.

Программные модули обработки и анализа выбранных метеорологических данных обеспечивают расчет климатических характеристик и применение выбранных статистических методов, сформированных автором и представленных в первой главе текста диссертации. Визуализация результатов вычислений производится на каждом этапе последовательности математических и/или статистических процедур обработки. Для каждого программного модуля в работе приводятся блок-схемы, демонстрирующие принципы их работы, а также подробное описание входных и выходных данных. Разработанные модули являются независимыми относительно обрабатываемой метеорологической информации и пространственно-временных границ. Гибкая структура полученного комплекса программ позволяет добавлять в него новые модули.

В заключительной части главы представлено описание роли разработанного комплекса программ в информационно-вычислительной веб-ГИС системе, создаваемой в ИМКЭС СО РАН для проведения научных исследований, связанных с обработкой и анализом архивов пространственно-привязанных геофизических данных, полученных в результате наблюдений и моделирования.

В третьей главе диссертационной работы представлены результаты исследования динамики приземной температуры воздуха и количества осадков на территории Сибири в период с 1979 по 2007 годы, полученные с использованием созданного комплекса программ.

Анализ состояния данных метеорологических величин (наблюдения и реанализы) для территории Сибири дал следующие результаты. В результате применения процедуры выбора однородных рядов наблюдений, для описания приземной температуры воздуха и количества осадков на территории Сибири в период 1961–2010 гг. только 59 временных рядов предоставляют необходимый для проведения исследований объем метеорологической информации (не более 5% пропусков измерений во временном ряде). Различие данных приземной температуры из различных версий реанализов составило в среднем 0,3°C между данными версий ECMWF (ERA-40, ERA INTERIM) и NCEP (NCEP/NCAR,

NCEP/DOE), с наименьшей величиной различий в теплый сезон года ($0,06^{\circ}\text{C}$), и наибольшей – в зимний сезон ($1,5 - 2^{\circ}\text{C}$). Анализ этих различий в широтном диапазоне показал заметное их увеличение с ростом широты в зимний период года ($5,4^{\circ}\text{C}$ в Западной Сибири, $7,7^{\circ}\text{C}$ – в Восточной Сибири). В летний сезон эта разница существенно меньше. Анализ данных количества осадков из архивов ERA INTERIM и APHRODITE JMA выявил отличия данных друг от друга в среднем в два раза. Изучение пространственного распределения значений количества осадков не выявило широтной зависимости различий.

В результате сравнения данных реанализов с выбранными 59 рядами инструментальных наблюдений по предложенной схеме сравнения, для описания поведения температуры воздуха на территории Сибири был выбран архив реанализа ECMWF ERA INTERIM (Рис.2а). Полученные величины различий в данных (станции с номерами 44 – 47 и 55) связаны с орографией положения станций (наибольшие различия – в горных районах Восточной Сибири, наименьшие – на Западно-Сибирской равнине). Для описания поведения количества осадков автором выбран архив данных APHRODITE JMA (Рис. 2б). Однако, результаты исследования осадков, с использованием этого набора данных следует принимать с осторожностью, поскольку при сравнении их с рядами натурных наблюдений однородность на половине станций не была достигнута.

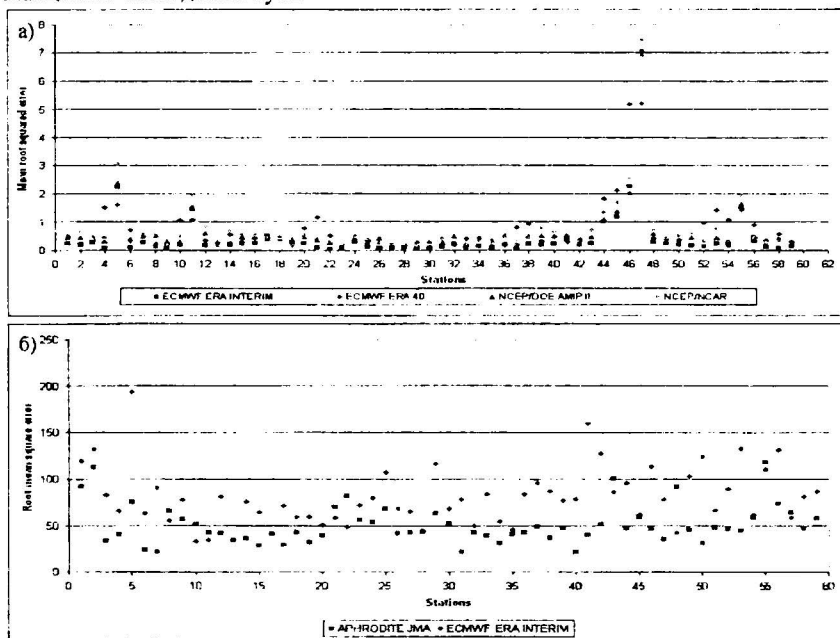


Рис. 2. Среднеквадратическое отклонение отличий значений данных моделирования и инструментальных наблюдений за период 1991 – 2000 гг. для каждой из 59 станции: приземная температура воздуха (а), количество осадков (б)

Анализ приземной температуры воздуха, проведенный в работе, позволил уточнить пространственные масштабы обнаруженных ранее изменений средних годовых температур с очагами потепления верхних широтах Восточной Сибири ($0,6 - 1,0^{\circ}\text{C}/10$ лет) и слабой тенденцией к похолоданию в ее центральной части – до $-0,2^{\circ}\text{C}/10$ лет. Динамика температур весеннего и осеннего сезонов, сопровождающаяся ростом температур весной до $1,2^{\circ}\text{C}/10$ лет (в апреле) на востоке, до $1,1^{\circ}\text{C}/10$ лет (в мае) на западе Сибири и осенью – до $1,4^{\circ}\text{C}/10$ лет на востоке (в ноябре) и $1,1^{\circ}\text{C}/10$ лет (в октябре) на западе Сибири, нашла отклик в колебаниях продолжительности вегетационного периода года (Рис. 3.а). На севере Сибири и к югу Западной Сибири наблюдается увеличения числа дней со среднесуточной температурой выше 5°C до 15 дней/10 лет. Сумма эффективных температур ($SDDT_j = \sum_{i=1}^l \Delta T_{ij}$, $\Delta T_{ij} = T_{ij} - 5$, где T_{ij} – среднесуточная температура дня i периода j , а l количество дней когда T_{ij} превысило 5°C) также растет к югу региона, достигая $200^{\circ}\text{C}/10$ лет. Полученные результаты анализа динамики температуры последних лет хорошо согласуются с результатами других авторов^{4,11} и количественно уточняют наблюдаемые изменения.

Динамика количества осадков холодного (ноябрь – апрель) и теплого (май – октябрь) сезонов на территории Сибири не выражена. Количество осадков холодного периода года характеризуется их увеличением на большей части региона Сибири в среднем на 2 мм/10 лет. Отрицательные величины тренда наблюдаются лишь в верхних широтах Западной Сибири, достигая $-2,5$ мм/10 лет в марте и -7 мм/10 лет в апреле. Для теплого периода года отмечен рост количества осадков на территории Средней и Восточной Сибири, достигая наибольших значений, 18 мм/10 лет, в июле и августе. Однако территории средних широт Западной Сибири характеризуется уменьшением количества осадков до -6 мм/10 лет (в июне). Анализ интенсивности осадков (Рис. 3.б) не выявил значимых изменений числа дней с осадками выше 1 мм, за исключением северного региона, где наблюдается их рост до 5 дней/10 лет.

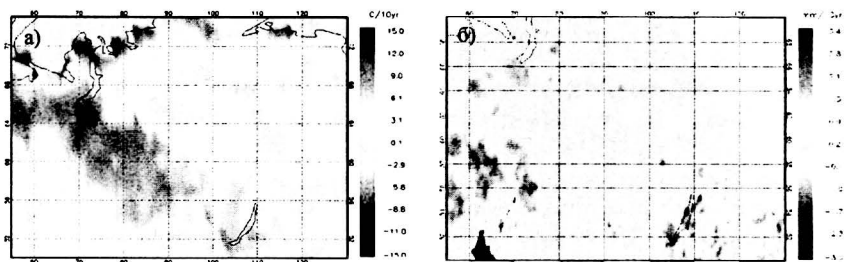


Рис. 3. Тренд продолжительности вегетационного периода года (а), тренд интенсивности количества осадков (б)

¹¹ Дюкарев Е.А. Изменчивость климата Западной Сибири во второй половине XX века // География и природные ресурсы. 2005. № 4. С. 70 – 75.

Сопоставление наблюдающихся изменений температуры воздуха и количества осадков позволило сделать предварительные выводы о том, что на юге территории Сибири формируются благоприятные условия для увеличения продуктивности растительности.

В **Заключении** диссертационной работы сформулированы основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Разработана методика сравнения данных реанализа с данными инструментальных наблюдений, с использованием которой для описания приземной температуры воздуха Сибири выбран набор данных ECMWF ERA INTERIM и для описания количества осадков – набор данных APHRODITE JMA .

2. Сформирован набор климатических характеристик и апробированных статистических методов для проведения анализа региональных климатических изменений.

3. На основе выбранных методов обработки и анализа метеорологической информации был разработан комплекс программ для изучения изменений регионального климата Сибири, являющийся частью информационно-вычислительной веб-ГИС системы.

4. Результаты анализа современного состояния приземной температуры воздуха и количества осадков на территории Сибири выявили на юге региона районы с наиболее благоприятными условиями для увеличения продуктивности растительности.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Titov A., Gordov E., Okladnikov I., Shulgina T.* Web-system for processing and visualization of meteorological data for Siberian environment research // *International Journal of Digital Earth*. – 2009. – Vol. 2, Iss. S1, DOI: 10.1080/17538940902866187. – P. 105–119.

2. *Шульгина Т.М., Богомолов В.Ю., Генина Е.Ю., Гордов Е.П.* Изучение поведения температуры на территории Сибири по данным наблюдений и Реанализа // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2009. – Вып. Кузбасс-2. – С. 275–279.

3. *Гордов Е.П., Богомолов В.Ю., Генина Е.Ю., Шульгина Т.М.* Анализ региональных климатических процессов Сибири: подход, данные и некоторые результаты // *Вестник Новосибирского государственного университета. Сер. Информационные технологии*. – 2011. – Т. 9, № 1. – С. 56–66.

4. *Shulgina T.M., Genina E.Yu., Gordov E.P.* Dynamics of climatic characteristics influencing vegetation in Siberia // *Environmental Research Letters*. – 2011. – DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045210. – 7 p.

5. *Окладников И.Г., Титов А.Г., Мельникова В.Н., Шульгина Т.М.* Веб-система для обработки и визуализации метеорологических и климатических данных // *Вычислительные технологии*. – 2008. – Т.13, спец. вып. 3. – С. 64–69.

6. *Гордов Е.П., Богомолов В.Ю., Генина Е.Ю., Шульгина Т.М.* Пространственно-временное поведение климатических характеристик,

контролировавших развитие бореальных экосистем России в конце XX века // Эколого-географические аспекты лесообразовательного процесса : материалы Всероссийской конференции. – Красноярск, 2009. – С. 58–61.

7. Шульгина Т.М., Генина Е.Ю., Гордов Е.П. Динамика температурного режима Сибири во второй половине XX века по данным наблюдений и реанализа // VIII сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу : материалы конференции. – Томск, 2009. – С. 171–173.

8. Окладников И.Г., Богомолов В.Ю., Гордов Е.П., Титов А.Г., Шульгина Т.М. Система обработки и анализа климатических данных // VIII сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу : материалы конференции. – Томск, 2009. – С. 336–337.

9. Гордов Е.П., Окладников И.Г., Титов А.Г., Шульгина Т.М. Использование геоинформационных технологий в построении Интернет-порталов для статистического анализа архивов пространственно-привязанных данных при проведении геофизических исследований // Научный сервис в сети Интернет: суперкомпьютерные центры и задачи : труды Международной суперкомпьютерной конференции. – М. : Изд-во МГУ, 2010. – С. 464–471.

10. Шульгина Т.М., Гордов Е.П., Окладников И.Г., Титов А.Г. Вычислительный блок информационной веб-ГИС системы для статистического анализа климатических процессов // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции RCDL'2010 : труды Всероссийской научной конференции. – Казань, 2010. – С. 201–206.

11. Шульгина Т.М., Гордов Е.П., Окладников И.Г., Титов А.Г. Вычислительный блок веб-ГИС системы для анализа климатических изменений: подход, данные и результаты для Сибири // Вычислительные и информационные технологии для наук об окружающей среде : избранные труды Международной молодежной школы и конференции CITES-2011. – Томск : Изд-во Том. ЦНТИ, 2011. – С. 166–169.

12. Gordov E.P., Genina E.Yu., Shulgina T.M. Climate change induced dynamics of boiclimatic indices for Siberia territory // Boreal forests in a Changing World: Challenges and Needs for Actions: Proceedings of the international conference / Sukachev Institute of Forest SB RAS. – Krasnoyarsk, 2011. – P. 216–219.

Подписано в печать 16.02.2012 г.
Формат А4/2. Ризография
Усл. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.
Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а